

## ENERGETYCZNA TRANSMITANCJA STRUKTURY BIODYNAMICZNEJ CZŁOWIEKA PODDANEGO DZIAŁANIU WIBRACJI OGÓLNEJ

Marian Witalis DOBRY, Magdalena GRYGOROWICZ

Politechnika Poznańska, Instytut Mechaniki Stosowanej, Zakład Wibroakustyki i Bio-Dynamiki Systemów  
60 – 965 Poznań, ul. Piotrowo 3,  
e-mail: [MarianDobry@put.poznan.pl](mailto:MarianDobry@put.poznan.pl), [MagdalenaGrygorowicz@doctorate.put.poznan.pl](mailto:MagdalenaGrygorowicz@doctorate.put.poznan.pl)

### Streszczenie

Badania przepływu energii w biodynamicznej strukturze ciała ludzkiego w pozycji siedzącej przy pobudzeniu do kinematycznych drgań siedziska umożliwiły zdefiniowanie i obliczenie wartości energetycznej transmitancji w funkcji częstotliwości pasma normowego oraz wartości transmitancji dla wszystkich punktów redukcji modelu dynamicznego badanej struktury. Transmitancja wykazała pasma częstotliwości i miejsca wzmocnienia oraz redukcji przepływu energii.

Słowa kluczowe: Energetyczna transmitancja, przepływ energii w biodynamicznej strukturze, drgania ogólne

### ENERGY TRANSMISSIBILITY OF BIODYNAMICAL STRUCTURE OF THE HUMAN BODY EXPOSED ON WHOLE-BODY VIBRATION

#### Summary

Investigations of energy flow in biodynamical structure of the human body in sitting position during kinematical excitation of seat allows defining and calculating values of energy transmissibility as a function of the frequency standard band and points of reduction of the dynamical model of studied structure. Transmissibility have shown bands of frequencies and points of amplification and reduction of energy flow.

Keywords: Energy transmissibility, energy flow in biodynamical structure, whole-body vibration

## 1. WPROWADZENIE

Badania literaturowe z zakresu wpływu drgań ogólnych na organizm człowieka-operatora wykazały, że istnieją mało optymistyczne statystyki chorób zawodowych (ponad 6 000 chorych w 2002 r.) [10]. W Polsce ciągle jeszcze mają miejsce nowe przypadki zachorowań na tzw. *zespół choroby wibracyjnej*<sup>1</sup> (około 200 przypadków w 2002 r.) [10]. Dzieje się tak mimo stosunkowo małych wartości dopuszczalnych ważonych przyspieszeń drgań określonych w paśmie normowym dotyczących drgań ogólnych w Polskiej Normie [8]. Całkowity obraz sytuacji uzupełnia liczba istniejących stanowisk pracy, na których pracownik ekspozowany jest na drgania ogólne. W roku 2002 odnotowano ich ponad 3,5 mln [10]. Istniejący stan rzeczy był przyczyną podjęcia próby zbadania wpływu drgań ogólnych na człowieka i poszukiwania nowego obiektywnego kryterium oceny w stosunkowo nowych dziedzinach przepływu energii i rozdziału mocy rozwijanych od 1996 roku w Laboratorium Dynamiki i Ergonomii

Metasystemu: Człowiek – Techniczny Obiekt – Środowisko. Metody energetyczne wykorzystana do tego celu zostały opracowane przez Dobrego [1, 2].

## 2. METODA ENERGETYCZNA ANALIZY DYNAMICZNEJ SYTEMÓW MECHANICZNYCH I BIOLOGICZNO - MECHANICZNYCH

Metoda energetyczna zastosowana do żywego systemu, który stanowi człowiek, opiera się na analizie biodynamicznego modelu badanego systemu i zastosowaniu zaawansowanej analizy rozdziału mocy i przepływu energii w jego strukturze. Głównym elementem takiej analizy jest modelowanie energetyczne, którego celem jest uzyskanie równoległe modeli: dynamicznego, modelu rozdziału mocy i przepływu energii badanego obiektu. Szczegółowy opis metody można znaleźć np. w [1, 2, 3, 6]. Opisując krótko modelowanie energetyczne można stwierdzić, że składa się ono z trzech zasadniczych faz. Pierwsza faza dotyczy analizy obiektu wybranego do badań (tzw. obiektu rzeczywistego) pod kątem właściwości dynamicznych jego struktury. W drugiej fazie należy opracować energetyczny, strukturalny model fizyczny rozdziału mocy i przepływu energii na podstawie uprzednio opracowanego modelu

<sup>1</sup> *Zespół choroby wibracyjnej* – niespecyficzna, wielobjawowa odpowiedź organizmu na drgania mechaniczne, wnikaające do ustroju z powierzchni, na której pracownik stoi lub siedzi [4]

dynamicznego badanego obiektu z wykorzystaniem Elementarnych Procesorów Przepływu Energii MWD (EPPE MWD) dla każdego punktu redukcji. Na potrzeby przeprowadzonych badań wpływu drgań na przepływ energii w organizmie człowieka przyjęty został nieco zmodyfikowany model fizyczny człowieka HBMN3 w pozycji siedzącej opracowany przez Nadera [9]. Trzecim etapem metody energetycznej jest budowa globalnego modelu energetycznego w postaci symulacyjnego programu przepływu energii w badanym systemie z wykorzystaniem programu MATLAB/simulink. Przejście z dziedziny dynamiki do dziedziny rozdziału mocy i przepływu energii związane było z zachowaniem dwóch zasad energetycznych sformułowanych przez Dobrego: Pierwszej Zasady Rozdziału Mocy i Pierwszej Zasady Przepływu Energii w Systemie Mechanicznym (zaszytych w EPPE MWD) [1, 2, 3].

### 3. TRANSMITANCJA ENERGETYCZNA

Opracowany model energetyczny badanej struktury człowieka w pozycji siedzącej umożliwił przeprowadzenie szeregu symulacji przepływu energii w strukturze biodynamicznej człowieka. Poszczególne części i narządy ciała w programie opisane zostały jako punkty redukcji modelu dynamicznych HBMN3.

Parametry wymuszenia kinematycznego przyjęte do badań zostały wzięte z normy drganiowej [12]. Czas trwania symulacji wynosił  $t = 22,5$  s. Był to czas, potrzebny do przejścia systemu dynamicznego przez dynamiczny proces przejściowy i osiągnięcia przez system stanu ruchu ustalonego.

Na podstawie uzyskanych wyników w przeprowadzonych badaniach energetycznych zdefiniowano i zaprezentowano po raz pierwszy **energetyczną transmitancję** struktury biodynamicznej człowieka poddanego działaniu wibracji ogólnej. Pokazano również po raz pierwszy jej charakterystykę w dziedzinie częstotliwości.

*Energetyczna transmitancja została zdefiniowana jako to stosunek wartości dawki energii przepływającej i absorbowanej przez punkt redukcji badanej struktury dynamicznej w danej częstotliwości i przy ustalonej amplitudzie drgań, odniesionej do wartości dawki energii przepływającej i absorbowanej przez ten punkt redukcji dla częstotliwości  $f = 4$  [Hz] i stałej amplitudzie drgań w całym badanym paśmie częstotliwości, dla ustalonego czasu symulacji  $T_s$ .*

Postać matematyczną powyższej energetycznej transmitancji przedstawiono poniżej:

$$ET \left( f, \vec{r}_i \right) = \frac{DE \left( f, \vec{r}_i, T_s \right)}{DE \left( f = 4 \text{ Hz}, \vec{r}_i, T_s \right)}; \quad (1)$$

gdzie:  $f$  – częstotliwość w Hz,

$\vec{r}_i$  – wektor wodzący punktu redukcji (położenie punktu w badanej strukturze dynamicznej),

DE – dawka energii w J,

$T_s$  – czas symulacji lub pomiaru przepływu energii.

Charakterystyka energetycznej transmitancji obrazuje krotność wzmocnienia lub redukcji przepływu energii w danym punkcie redukcji badanej struktury w funkcji częstotliwości i jest wielkością bezwymiarową.

Jak wiadomo z normy drganiowej największą wrażliwość na drgania ogólne organizm człowieka wykazuje przy częstotliwości  $f = 4$  [Hz] i odpowiadającej jej wartości skutecznej przyspieszenia drgań  $a = 0,315 \text{ m/s}^2$  [12]. Taką właśnie amplitudę przyspieszenia drgań przyjęto podczas symulacji jako warunki odniesienia do uzyskania wartości energetycznej transmitancji w paśmie normowym od 1 do 80 Hz.

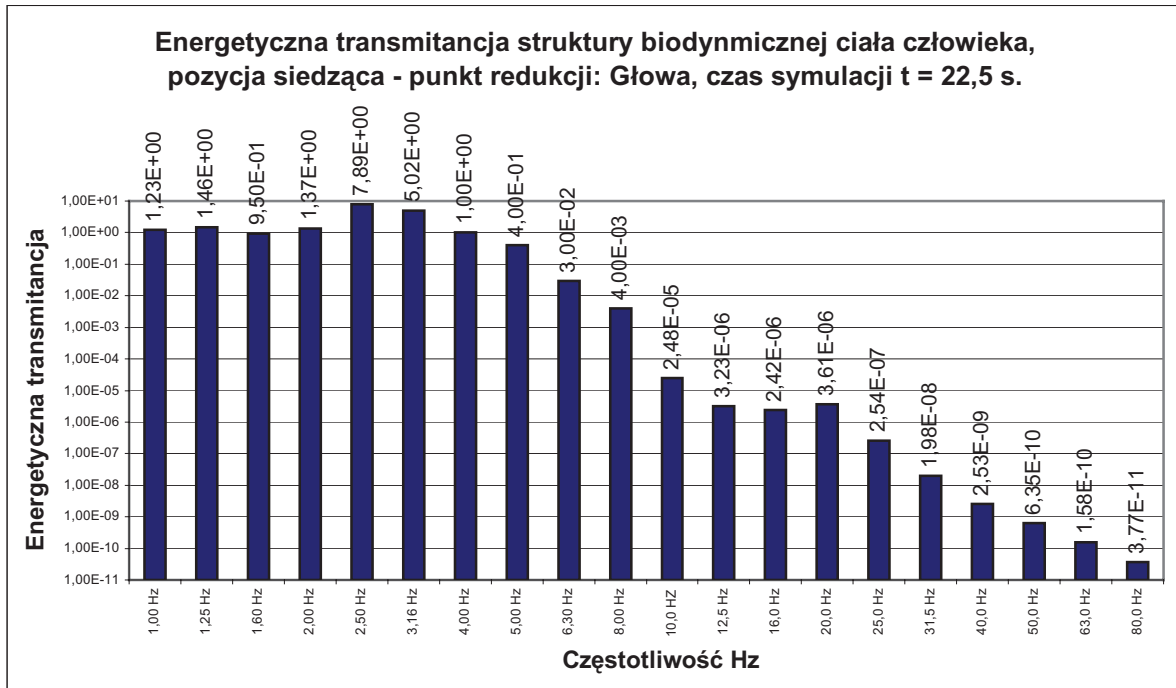
Poniżej na rysunku 1 przedstawiono energetyczną transmitancję dla punktu redukcji - Głowa, a na rysunku 2 energetyczną transmitancję (strukturalną) dla wszystkich punktów redukcji badanej struktury dynamicznej przy częstotliwości pobudzenia kinematycznego równej 2,5 Hz.

Przedstawiona na rysunku 1 energetyczna transmitancja wykonana dla punktu redukcji Głowa charakteryzuje się bardzo dużą dynamiką uzyskanych wartości transmitancji w analizowanym paśmie normowym częstotliwości. Jej rozpiętość osiąga 12 rzędów wielkości. Maksymalne wzmocnienie przepływu energii w tym punkcie redukcji wyniosło 7,89 dla częstotliwości wymuszenia kinematycznego  $f = 2,5$  Hz. Natomiast, maksymalna redukcja przepływu energii do punktu redukcji Głowa miała miejsce dla częstotliwości 80 Hz i wyniosła 3,77 E-11.

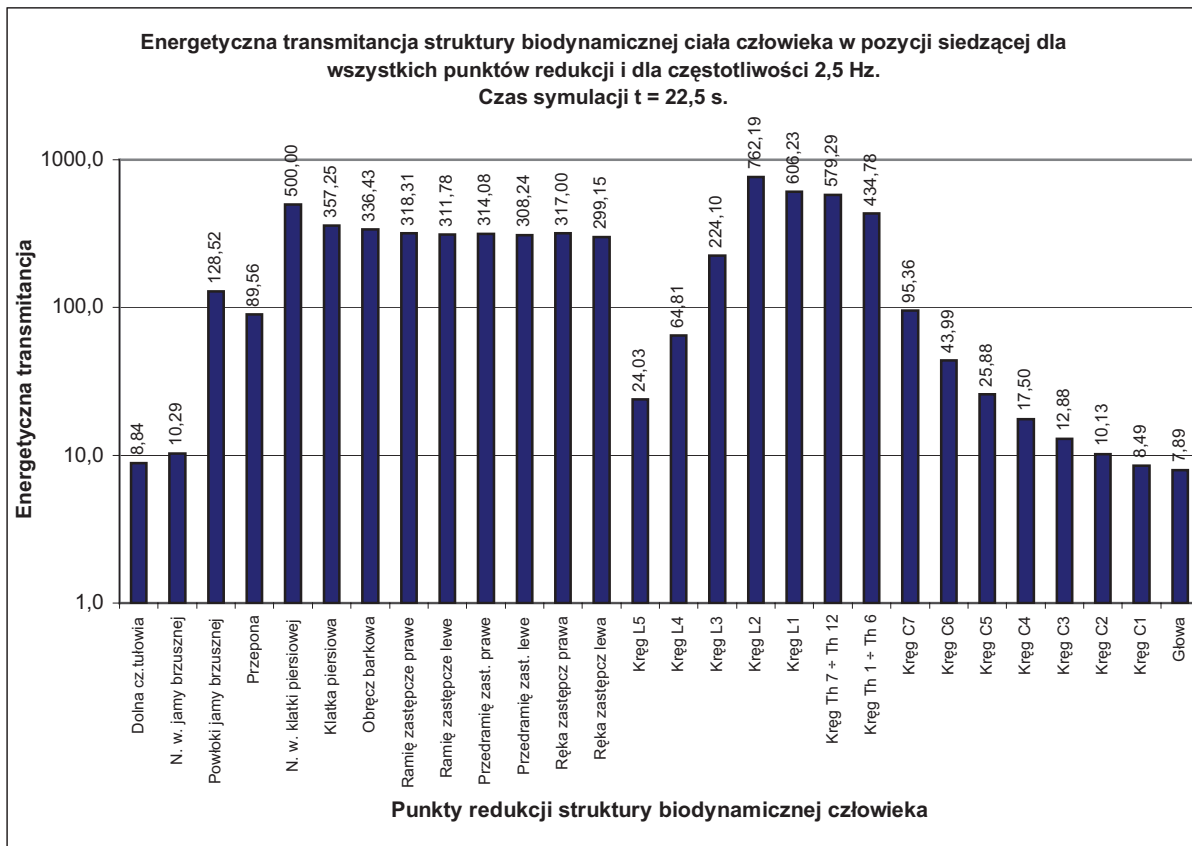
Ogólnie podsumowując te badania można stwierdzić, że wzmocnienie przepływu energii miało miejsce w paśmie niskich częstotliwościach od 1 do 3,16 Hz (z wyjątkiem  $f = 1,6$  Hz), natomiast w pozostałym paśmie częstotliwości od 5 do 80 Hz nastąpiła redukcja przepływu energii.

Jak już wspomniano, najwyższą wartość energetycznej transmitancji dla Głowy osiągnięto przy częstotliwości pobudzenia  $f = 2,5$  Hz. Z tego powodu wybrano tę częstotliwość do przedstawienia transmitancji energetycznej wszystkich punktów redukcji w modelu HBMN3 i pokazano ją na rysunku 2.

Jak wynika z rysunku, **wszystkie punkty redukcji osiągnęły wzmocnienie przepływu i absorpcji przez nie energii.**



Rys. 1. Energetyczna transmitancja struktury biodynamicznej ciała człowieka w pozycji siedzącej – punkt redukcji: Głowa dla środkowych częstotliwości 1/3 oktaowych w paśmie normowym i amplitudy przyspieszenia drgań siedziska  $a = 0,315 \text{ m/s}^2$



Rys. 2. Energetyczna transmitancja struktury biodynamicznej ciała człowieka w pozycji siedzącej dla wszystkich punktów redukcji i dla częstotliwości  $f = 2,5 \text{ Hz}$  oraz amplitudy przyspieszenia drgań siedziska  $a = 0,315 \text{ m/s}^2$

Najmniejsze wzmocnienie przepływu energii wykazano w punkcie redukcji - Głowa i było równe tylko 7,89. Natomiast największe wzmocnienie przepływu energii wykazała transmitancja dla punktu redukcji – Krąg lędźwiowy L2 i wyniosło ono 762,2.

Przytoczona energetyczna transmitancja potwierdza wzmacniające przepływ energii właściwości dynamicznej struktury ciała ludzkiego w pozycji siedzącej przy pobudzeniu harmonicznym siedziska ze stabilizacją przyspieszenia drgań. Dla energetycznej funkcji przejścia na drodze Siedzisko-Głowa wzmocnienie to jest najmniejsze, co świadczy o anatomicznym – dynamicznym oporze przepływu energii na tej drodze. **Wynik ten świadczy o najlepszej ochronie Głowy – ważnego elementu dynamicznej struktury ciała ludzkiego, przed drganiami kinematycznymi siedziska ocenionej w dziedzinie przepływu energii.**

Energetyczna transmitancja wykazała, że największe wzmocnienie przepływu energii nastąpiło dla następujących punktów redukcji w kolejności malejącej: **Krąg L2 - 762, Krąg L1 - 606, Kregi Th 7÷Th 11 - 579, Kregi Th 1÷Th 6 - 434, Krąg L3 - 224 i Kreg C 7 - 95.** Są to kręgi odcinka lędźwiowego, piersiowego i szyjnego kręgosłupa. **Uzyskane wyniki energetycznej transmitancji potwierdzają najczęściej zgłaszane i rejestrowane przez medycynę pracy dolegliwości i urazy tych odcinków kręgosłupa u kierowców, operatorów maszyn, pojazdów szynowych i pilotów oraz wszystkich innych narażonych na drgania ogólne [9].**

#### 4. PODSUMOWANIE

Zaproponowane nowe podejście do analizy dynamicznej systemów mechanicznych i biodynamicznych w dziedzinie przepływu energii ujawniło istotne z punktu widzenia oceny dynamiki właściwości. Są nimi: duża dynamika zmian kryterialnej wielkości energetycznej, którą jest dawka energii oraz możliwość globalnego ujęcia oceny w postaci globalnej dawki wpływającej do człowieka poddanego oddziaływaniu drgań ogólnych.

Zdefiniowana po raz pierwszy **energetyczna transmitancja badanej struktury dynamicznej** i przedstawiona w funkcji częstotliwości drgań pobudzających umożliwiła wskazanie pasm częstotliwości, dla których zachodzi wzmocnienie i redukcja przepływu energii. **Są to niezwykle istotne dane do opracowania skutecznej wibroizolacji siedzisk kierowców, operatorów maszyn i pilotów oraz energetycznej metody oceny proponowanych rozwiązań konstrukcyjnych**

Opracowana energetyczna transmitancja przepływu energii umożliwia ponadto wskazanie punktów redukcji struktury dynamicznej o najwyższej koncentracji przepływu energii. Daje to możliwość

określenia z dużym prawdopodobieństwem, w którym organie czy narządzie wystąpią zaburzenia funkcjonalne i zmiany chorobowe. Wstępna analiza danych medycznych i koncentracji przepływu energii wykazała zgodność miejsc maksymalnej koncentracji z dolegliwościami zgłaszanymi przez pacjentów przychodni medycyny pracy biorąc pod uwagę np. tylko kręgosłup. Są to kręgi odcinka lędźwiowego, piersiowego i szyjnego [8, 9].

Dalsze badania w tym zagadnieniu będą kontynuowane.

#### LITERATURA

- [1] Dobry M. W., „*Optymalizacja przepływu energii w systemie Człowiek – Narzędzie – Podłoże (CNP)*”, Rozprawa habilitacyjna. Seria „Rozprawy” nr 330, Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań, marzec 1998
- [2] Dobry M. W., „*Pierwsza Zasada Przepływu Energii jako podstawa uogólnionej metody analizy dynamicznej systemów mechanicznych*”. Materiały Konferencyjne „Napędy, IV szkoła analizy modalnej”, Edytor T. Uhl, Szczyrk XII 1999, s. 117–122
- [3] Dobry M. W., „*Energetyczne oddziaływanie drgań technicznych środków transportu na organizm ludzki – wprowadzenie*”, Materiały Konferencyjne, Oddziaływanie drgań technicznych środków transportu na organizm ludzki, Wydż. Transportu, Polit. Warszawska i Rhein – Westfalische Technische Hochschule Aachen, Warszawa XI 1999 s. 125 – 134
- [4] Dobry M. W., Kolecka M. „*Energetyczny wpływ drgań ogólnych na organizm człowieka*” Zeszyty naukowe MECHANIKA nr 83, Politechnika Krakowska, Kraków 2001, s. 69 – 76
- [5] Dobry M. W., Kolecka M. „*Rozdział mocy w systemie Człowiek – Pojazd*”. Proceedings 12<sup>th</sup> International Conference on Noise Control, Noise Control '01, 24-26 September 2001 Kielce, CIOP Warszawa 2001, s. 95-101
- [6] DOBRY M. W.; „*Energy analysis of mechanical and biomechanical systems*”, STUDIA I MATERIAŁY LIII, TECHNIKA 3, Współczesne problemy techniki, Oficyna Wyd. Uniwersytetu Zielonogórskiego, Zielona Góra 2003, s. 137-158
- [7] Kolecka M., „*Analiza przepływu energii w systemie Człowiek – Pojazd CP*”, Praca dyplomowa magisterska pod kierunkiem M. W. Dobrego, Wydż. Budowy Maszyn i Zarządzania, Politechnika Poznańska, Poznań 2000
- [8] Marek K., „Choroby zawodowe”, PZWL Warszawa 2003
- [9] Nader M., „Modelowanie i symulacja oddziaływania drgań pojazdów na organizm człowieka” Rozprawa habilitacyjna, Wydział Transportu, z. 46, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2001
- [10] Rocznik Statystyczny Rzeczypospolitej Polskiej 2002, Główny Urząd Statystyczny, Warszawa 2002
- [11] PN 82/N-01350. Drgania. Terminologia. Wyd. Normalizacyjne „ALFA”, 1983.
- [12] PN 91/N – 01354. Drgania. Dopuszczalne wartości przyspieszenia drgań o ogólnym oddziaływaniu na organizm człowieka i metody oceny narażenia.